

(مقاله ترویجی)

مروری بر روش‌های مسیریابی انرژی آگاه مبتنی بر ناحیه‌بندی فیزیکی در شبکه‌های حسگر صوتی متراکم و اینترنت اشیاء زیرآبی

محمد رضا خسروی^۱، محمد کاظم مقیمی^۲، حبیب رستمی^۳

mohammadxosravi@acm.org

۱- پژوهشگر همکار (دکتری)، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه خلیج فارس

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مخابرات، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۳- دانشیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه خلیج فارس

چکیده

شبکه‌های مخابراتی صوتی (آکوستیک) در زیرآب دارای کاربردهای فراوان در صنایع مختلف از جمله نفت و گاز می‌باشد. مساله طول عمر گره‌ها و پایداری شبکه برای انتقال اطلاعات مهم‌ترین پارامتر در طراحی این شبکه‌ها است زیرا معمولا تعویض باتری به دلیل شرایط پیچیده نصب حسگرها در زیرآب، به راحتی امکان پذیر نیست. بنابراین بهبود مصرف انرژی شبکه بسیار مهم است تا جایی که باتری‌ها نهایت طول عمر را داشته باشند. در این بین، از طریق بهینه‌سازی فرایند مسیریابی می‌توان به شکل موثرتری به کاهش مصرف انرژی کمک کرد. هدف از این مطالعه، مرور نظام مند و تحلیل روند طراحی روش‌های مسیریابی و یافتن افق‌هایی در جهت رهیافت‌های پیشرفته‌تر است. در این تحقیق، تمرکز به صورت ویژه بر طراحی مبتنی بر ناحیه‌بندی فیزیکی است. مقصود از ناحیه‌بندی فیزیکی صرفا یک بخش‌بندی مجازی در محیط سه بعدی زیرآب است که به منظور انتقال بهتر و انرژی آگاه بسته‌های اطلاعاتی در یک شبکه مخابراتی زیرآبی با عناصر حسگری صوتی (و یا در حالت کلی‌تر در یک بستر اینترنت اشیاء زیرآبی) صورت می‌گیرد.

واژگان کلیدی: شبکه‌های حسگر صوتی زیرآبی، طول عمر باتری، پروتکل‌های مسیریابی، ناحیه‌بندی فیزیکی، پیشرانی بسته‌ها.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۰۳/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۸/۰۱

صص ۱۰-۲۴

مقدمه

پروتکل‌های مسیریابی در شبکه‌های کامپیوتری و مخابراتی به عنوان بخش مهم و تاثیر گذار در عملکرد شبکه شناخته می‌شوند. شبکه‌های بی‌سیم حسگر صوتی زیرآبی کاربرد نسبتاً جدیدی از شبکه‌های مخابراتی محسوب می‌شود که از سال ۲۰۰۰ میلادی و پس از آن یکی از جذاب‌ترین زمینه‌های پژوهشی بوده است [۱]-[۴۱]. همچنین امروزه با تلفیق پلتفرم‌های مخابراتی و محاسباتی، این موضوع به عنوان بخشی از مساله جامع‌تر اینترنت اشیاء زیرآبی^۱ برای حسگرها/فعال‌سازهای ثابت، وسائل متحرک و ربات‌های زیرآبی نیز شناخته می‌شود. قبل از این مخابرات زیرآب عمدتاً به مخابره لایه فیزیکی و نیز مباحث پردازش سیگنال معطوف بود و چندان بحث شبکه مطرح نبود. در این زمان بود که تحقیقی مهم تحت عنوان شبکه‌های صوتی زیرآب توسط سوزر و دیگران [۳۰] ارائه گردید و با معرفی یک کاربرد جدید برای شبکه‌های مخابراتی، چالش‌های شبکه‌های مخابراتی مبتنی بر لایه فیزیکی صوتی بررسی شد. امروزه شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم برای کاربرد در زیر آب استفاده می‌شوند. نظارت و پایش زیر سطح آب در دریاها و اقیانوس‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است و علت این امر کاربردهای متفاوت نظامی، زیست محیطی و صنعتی است. برای نمونه ردیابی و شناسایی زیردریایی‌ها نیاز به وجود امکانات رصد زیر دریا دارد و یا پایش‌های زیست محیطی جهت شناسایی منابع آلودگی زیرسطحی از کاربردهایی است که نیاز به نظارت زیرسطحی دارد. از دیگر کاربردها می‌توان به استفاده از نظارت زیر سطحی جهت کشف منابع طبیعی زیر دریا مانند نفت، گاز و معادن اشاره کرد. برای انجام این نظارت، لازم است که حسگرهایی در زیر سطح آب وجود داشته باشند. از آنجا که این نظارت در سطح گسترده‌ای از زیر آب انجام می‌شود لازم است تعداد زیادی از این حسگرها (سونار، ابزارهای نوری، لیزری، مغناطیسی و ...) در زیر آب استقرار یابند و بنابراین برای تحلیل درست خروجی این دسته از حسگرها، لازم است تا آن‌ها با هم شبکه شوند و اطلاعات را رد و بدل نمایند. از آنجایی که برپایی شبکه سیمی یا شبکه بی‌سیم مرکزگرا^۲ در زیر آب و خصوصاً در عمق زیاد بسیار هزینه‌بر و در

برخی کاربردها به لحاظ فنی غیرممکن یا زمان‌بر است لذا از شبکه‌های بی‌سیم بدون زیرساخت^۳ استفاده می‌کنند. از طرفی در این شبکه‌های بی‌سیم به علت این که برد امواج الکترومغناطیسی بسیار کوتاه است از امواج آکوستیکی برای برقراری ارتباط بین حسگرها استفاده می‌شود، به چنین شبکه‌هایی، شبکه‌های حسگر صوتی^۴ زیرآبی می‌گویند. شبکه‌های حسگر بدون داشتن نقطه دستیابی مرکزی^۵ در محیط، قادرند به تبادل اطلاعات بپردازند. مساله مورد بحث در اینجا لزوم بررسی چالش‌ها و ایجاد بهبودهایی جهت فرایند مسیریابی در چنین شبکه‌هایی است تا پارامترهای مهم شبکه ارتقاء پیدا کنند. از آنجا که شبکه‌های نام برده غالباً سه بعدی و متحرک هستند [۱۰]-[۱۲]، بصورت ذاتی مسیریابی آن‌ها از دیگر شبکه‌های بدون زیرساخت پیچیده‌تر است. در ادامه به بررسی معماری شبکه‌ها و چالش‌های متناظر آن‌ها می‌پردازیم. شبکه‌های حسگر صوتی زیرآب دارای چالش‌ها و پارامترهای زیادی هستند که عمده آن مربوط به پیچیدگی‌های زیردریا است. چالش‌های زیر مهم‌ترین موضوعات این زمینه است و اعمال سیاست‌های بین لایه-ای در لایه‌های مختلف می‌تواند این چالش‌ها و پارامترها را ارتقاء دهد و مسیریابی یکی از مهم‌ترین این سیاست‌ها است [۴].

- مصرف انرژی: در زیردریا به انرژی خورشید دسترسی وجود ندارد. از طرفی اگر شبکه از ساحل دور باشد یا تحرک گره‌ها بالا باشد، امکان رساندن انرژی توسط سیم هم وجود ندارد. بنابراین راه حل استفاده از باتری است. پس باید مصرف انرژی بهینه باشد و بتوان طول عمر شبکه را افزایش داد.

- تاخیر لینک‌های ارتباطی: سرعت صوت در زیرآب ثابت نیست ولی به صورت تقریبی در حدود ۱۵۰۰ متر بر ثانیه است و بنابراین اثر این تاخیر انتشاری باید تا جای ممکن با کاهش تاخیر پردازشی^۶ کاهش یابد تا تاخیر شبکه قابل قبول شود.

- محدودیت ظرفیت کانال و نرخ داده پایین: ظرفیت انتقال کانال در شبکه‌های زیرآب صوتی نسبت به دیگر

³ Without-Structure (Ad-Hoc) Wireless Networks

⁴ Acoustic Sensor Networks (ASNs)

⁵ Central Access Point

⁶ Processing Delay

¹ Internet of Underwater Things (IoUT)

² Structural Wireless Networks

عاملی است تا توان اجرا کردن الگوریتم های شبکه‌ای پیچیده را نداشته باشد و نیز در صورت اجرا تاخیر پردازشی بالایی داشته باشد که خود در نهایت تاخیر کلی شبکه را افزایش می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت در کاربردهای زمان حقیقی یا شبه زمان حقیقی، بحث پیچیدگی محاسباتی الگوریتم‌ها و از جمله الگوریتم‌های مسیریابی از اهمیت بالایی برخوردار است. حجم حافظه هم محدود است و این مساله طراحی الگوریتم‌ها را با چالش‌های بیشتری مواجه می‌کند. اساسا شبکه اقتضائی یک سیستم توزیع شده است (در رده سیستم‌های پردازش موازی و محاسبات ابری) و لذا فرض می‌شود هر جزء سیستم به لحاظ قدرت پردازشی چندان قوی نیست و سیستم در مجموع دارای قابلیت بالایی است (در هنگام شروع بحث شبکه‌های نامبرده در حوالی ۱۹۹۰، طراحی میکروکامپیوترها و ساخت حافظه‌های با ظرفیت بالا و سریع که ابعاد کوچکی نیز داشته باشند، پیشرفتی مانند امروزه نداشت و لذا تا حدی هم علت این تفکر همین مسائل است).

این چالش‌ها مهم‌ترین مسائل یک شبکه حسگر هستند و ذکر این نکته لازم است که برخی از چالش‌ها ساختاری هستند و برخی دیگر چالش‌های هدف نامیده می‌شوند. برای مثال تحرک گره‌ها یا تراکم آنها یک مشکل ساختاری و وابسته به کاربرد است و کاربر شبکه ضعف‌های ناشی از این چالش‌ها را در قالب مواردی مثل وضعیت ترافیکی نامناسب مشاهده خواهد کرد، بنابراین اجزای ترافیک مثل تاخیر لینک ارتباطی یک چالش هدف است که از موارد متعددی متاثر است. برای پاسخ به چالش‌های فوق معماری‌های مختلفی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم زیر آب ارائه شده که در کل می‌توان آن‌ها را به دو دسته تقسیم کرد: ۱- معماری ایستا ۲- معماری پویا^۷.

در ادامه به معرفی این دو خواهیم پرداخت. منظور از معماری ایستا، معماری است که گره‌ها پس از استقرار، از مکان تقریباً ثابتی برخوردار هستند و میزان حرکت آنها بسیار کم و معمولاً قابل چشم پوشی است. در این معماری ممکن است گره‌ها به کف دریا متصل شوند و یا روی سطح آب مهار شوند. این شبکه‌ها را می‌توان به دو

شبکه های مخابراتی کم می‌باشد و پهنای باند محدود است. مقدار ترافیک نمونه برای کانال صوتی در فواصل نزدیک (که حداکثر ممکن می‌شود) در مرتبه چند ده کیلو بیت بر ثانیه است.

- امنیت مسیریابی^۱: امنیت هم می‌تواند یک هدف در شبکه باشد. مبارزه با اختلال گر صرفاً در لایه کاربرد اتفاق نمی‌افتد و در لایه‌های میانی شبکه هم می‌توان با اختلال-گر مبارزه کرد.

- تراکم گره‌ها: در شبکه‌های حسگر هم تراکم کم و هم تراکم بالا چالش تلقی می‌شود، در شبکه‌های کم تراکم^۲ مشکل عمدتاً مربوط به پایین بودن نسبت تحویل بسته‌ها و تاخیر زیاد لینک‌های ارتباطی است و در شبکه‌های متراکم^۳ نسبت تحویل بسته معمولاً بالا است و مشکل بیشتر مصرف بالای انرژی است. طراحی مقیاس پذیر نسبت به تراکم می‌تواند اتفاق بیفتد و منظور وفق پذیری با شرایط تراکمی مختلف است.

- تحرک گره‌ها: به دلیل تغییرات زیاد در توپولوژی شبکه، به خصوص هنگام داشتن گره‌های متحرک، مساله همگرایی^۴ مسیریابی در شبکه یک چالش مهم می‌باشد. طراحی مقیاس پذیر نسبت به تحرک می‌تواند اتفاق بیفتد. مقیاس پذیری^۵ نسبت به تحرک یا تراکم را گاهی مقاومت^۶ در طراحی نیز می‌نامند.

- قدرت پردازشی و حجم حافظه گره‌های حسگر: عموماً پرادانه گره‌های حسگر توان پردازشی بالایی ندارد و این

¹ Routing Security

² Sparse

³ Dense

^۴ منظور از همگرایی صرفاً تضمین در تحویل بسته است، یعنی اینکه شبکه کارکرد داشته باشد و مسیریابی انجام شود (با تاخیر کلی ارتباط زیاد یا کم - تاخیر در مفهوم QoS مد نظر است و نه تاخیر صف بندی در فرایند مسیریابی - البته تاخیر صف بندی یا پردازشی شبکه از ارکان تاخیر کلی ارتباط است - ، برای مثال تاخیر زمان حقیقی در مخابره داده). چالش اصلی که مساله همگرایی این دست شبکه‌ها را تهدید می‌کند، تحرک بالا است که رفع تهدید مستلزم استفاده از الگوریتم‌های مسیریابی سریع‌تر است (با تاخیر صف بندی کمتر در فرایند مسیریابی) به طوری که حتی عملکرد آن می‌تواند از جهت برخی ملاحظات زیربینه باشد (مثلاً مسیرهای انتخابی کوتاه-ترین نباشد، چندمسیری وجود داشته باشد که اتلاف ذاتی انرژی شبکه است و ...). این تسریع ربطی به تاخیر در مفهوم QoS ندارد و صرفاً همگرایی در تحویل بسته است.

⁵ Scalable

⁶ Robustness

⁷ Static and Dynamic Architecture

- پروتکل‌هایی که برای تصمیم‌گیری از اطلاعات محیطی مبتنی بر پرس و جو از همسایگانشان استفاده می‌کنند:^۳ این پروتکل‌ها بخشی از ترافیک و پهنای باند (زمان - فرکانس) و نیز انرژی شبکه را صرف ارسال و دریافت بسته‌های کنترلی می‌نمایند تا از موقعیت نسبی خود در شبکه مطلع شوند (ضمناً، مطابق تئوری امنیت بسیاری از حملات لایه ۳ بر اثر استفاده از بسته‌های کنترلی رخ می‌دهد) و سپس اگر دارای شرایط مساعد برای شرکت در مسیریابی باشند، بسته دریافتی را پیش می‌رانند.^۴ برای مثال می‌توان به پروتکل Hydro Cast اشاره کرد که از انواع پروتکل‌های مبتنی بر خوشه‌بندی^۵ است [۳۱].

- پروتکل‌هایی که برای تصمیم‌گیری از اطلاعات خارجی استفاده می‌کنند ولی این اطلاعات توسط یک سیستم جامع موقعیت‌یابی در اختیار آن‌ها قرار می‌گیرد و نه از طریق پرس و جو از همسایگان: ویژگی مثبت این روش نداشتن ترافیک کنترلی است و نکته منفی راجع به آن‌ها نیاز به برقراری یک سیستم موقعیت‌یابی است. بدیهی است یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای شبکه‌های حسگر الکترومغناطیسی^۶ که بیرون از آب برپا می‌شوند، استفاده از GPS است و پیچیدگی این سیستم برای شبکه‌های حسگر زیرآبی بسیار بیشتر است و ۳ دلیل عمده آن عبارت‌اند از: ۱- شبکه‌های زیرآب عمدتاً سه بعدی هستند (امروزه سیستم‌های موقعیت‌یابی GPS برای کاربرد در زیرآب و به صورت سه بعدی طراحی شده‌اند) ۲- پهنای باند سیستم موقعیت‌یابی باید مجزا باشد تا تداخل رخ ندهد ولی این مساله بر خلاف بیرون آب که به

دسته دو بعدی و سه بعدی تقسیم کرد. در مدل دو بعدی هدف پایش یک صفحه مانند کف دریا و یا سطح آب است ولی در مدل سه بعدی هدف پایش یک حجم از فضای زیر دریا است. در نوع معماری پویا، همه گره‌ها آزاد هستند، گره‌ها به صورت ماشین‌های زیرآبی خودکار^۱ (کنترل هوشمند) و یا کنترل از راه دور هستند^۲ (کنترل با سیم) و تحرک شبکه قابل اغماض نیست. اساساً طراحی برای این مورد دشوارتر است و نتیجه به دست آمده کلی‌تر و قابل‌تعمیم به شبکه با توپولوژی ایستا است [۸].

نوع سومی از معماری شبکه هم وجود دارد که ترکیب دو معماری فوق است. این معماری را ترکیبی (هایبرید) گویند و در آن هم گره‌های متحرک و هم ایستا وجود دارند. نکته دیگر آن است که در همه معماری‌ها بحث ابعاد فضای مسیریابی هم مطرح است. به طور کلی طراحی برای محیط‌های سه بعدی از دو بعدی دشوارتر است. اگرچه طراحی الگوریتم‌ها برای هر معماری اختصاصی است و نتیجه طراحی تخصصی بهینه‌تر است ولی اساساً طراحی برای پیچیده‌ترین حالات یعنی معماری سه بعدی پویا به سایر معماری‌ها تعمیم پذیرتر است.

در این مقاله مفهوم لایه‌بندی مطابق مدل OSI برای این گونه شبکه‌ها تشریح می‌گردد و چیزی که امروزه واضح است، مسائل شبکه‌های حسگر زیرآبی نیز مانند دیگر شبکه‌های بی‌سیم اقتضائی و حسگر بیشتر معطوف به لایه‌های ۱ تا ۴ (OSI) است و این شبکه‌ها اغلب (و نه لزوماً) از همان پروتکل‌های لایه کاربرد مبتنی بر استاندارد TCP/IP برای لایه کاربرد خود استفاده می‌نمایند. بنابراین جز مسائل لایه فیزیکی و بسیاری از مسائل لایه پیوند داده‌ها که پیش‌تر هم در حوزه پژوهشی سیستم‌های مخابراتی طبقه‌بندی شده بود، مسیریابی به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های جدید برای این کاربرد مطرح است. الگوریتم‌های مسیریابی در شبکه‌های بی‌سیم حسگر عموماً با توجه به اطلاعات مورد نیاز برای تصمیم‌گیری توسط گره‌های میانی (گره‌های حسگری که به عنوان مسیریاب هم فعالیت می‌کنند) جهت شرکت یا عدم شرکت در فرایند مسیریابی، به ۴ دسته تقسیم می‌شوند:

³ Beacon-based Protocols

⁴ Forwarding

^۵ لازم به ذکر است که خوشه‌بندی یکی از مهم‌ترین روش‌های مسیریابی در شبکه‌های بی‌سیم اقتضائی و حسگر و تاکنون پروتکل‌های بسیار زیادی با استفاده از این مفهوم ارائه شده‌اند. پروتکل‌های مخصوص شبکه‌های زیرآب در [۳] مرور شده‌اند. در این دسته از پروتکل‌ها، تشکیل خوشه‌ها به اطلاعات محیطی (شبکه‌ای) نیاز دارد و استراتژی طراحی خوشه‌ها با استفاده از این اطلاعات و تعریف توابع هزینه در نهایت به یک مساله بهینه‌سازی می‌تواند تبدیل شود که مبتنی بر روش‌های تشخیص الگو و پردازش تکاملی و در جهت تشکیل بهینه خوشه‌ها قابل حل خواهد بود. هر خوشه اغلب یک مسیریابی خودمختار بر مبنای الگوریتم سیل آسا دارد و دروازه ارتباطی اعضای هر خوشه با مابقی گره‌ها از گرهی به نام سرخوشه است.

⁶ Terrestrial/Electromagnetic Sensor Network

¹ AUV (Autonomous Underwater Vehicles)/UUV (Unmanned Underwater Vehicles)

² ROV (Remotely Operated Vehicles)

هدف را در مصرف انرژی شبکه (قابلیت اعتماد یا مقاومت^۲)، نرخ تحویل (ترافیک) و تاخیر (ترافیک) خلاصه کرد. حال در بسیاری از کاربردها که مصرف انرژی از ترافیک هم بسیار مهمتر است، استفاده از پروتکلی نظیر DBR بهینه نیست، زیرا بسیاری از پروتکل‌های جغرافیایی مبتنی بر خوشه‌بندی یا در حالت کلی بسته‌های کنترلی هستند که به مراتب کارایی انرژی بهتری نسبت به DBR دارند، مانند پروتکل EEDBR [۳۴] که از منظر مصرف انرژی و ترافیک از پایه خود یعنی DBR برتر است. ذکر این نکته خالی از لطف نیست که پروتکل‌های ترکیبی (نوع ۳) پرشماری وجود دارد که حتی از نظر ترافیک با وجود محدودیت‌های اشاره شده از DBR برتر هستند. پروتکل‌های مسیریابی از جهت نوع تصمیم‌گیری گره‌های میانی نیز به مسیریابی مبداء^۳ و گره به گره^۴ تقسیم می‌شوند و در ادامه به این موضوع خواهیم پرداخت. بسیاری از الگوریتم‌های مسیریابی حریصانه^۵ هستند، یک روش برای دستیابی به الگوریتم‌های مسیریابی حریصانه، طراحی پروتکل به صورت گره به گره است و در نتیجه پروتکل‌های این چنینی را پروتکل‌های مسیریابی گره به گره گویند. در این پروتکل‌ها هر گره دریافت‌کننده خود به تنهایی و مستقل تصمیم می‌گیرد که در مسیریابی شرکت کند یا نکند. در مقابل این تعریف، پروتکل‌های مسیریابی مبداء قرار می‌گیرند که تعیین شرکت یا عدم شرکت گره در مسیریابی از قبلاً توسط گره مبداء تعیین می‌شود. پروتکل VBF از نوع مسیریابی مبداء است (بعدا توضیح خواهیم داد که به دلایل دیگری پروتکل VBF هم با وجود گره به گره نبودن حریصانه است) و البته نسخه توسعه یافته‌ای از آن هم وجود دارد که در سال ۲۰۰۷ معرفی شده و از نوع مسیریابی گره به گره است. این پروتکل را HH-VBF گویند [۵] و بعداً آنرا بیشتر تشریح می‌کنیم. پروتکل DBR به صورت ذاتی گره به گره است و از این جهت حریصانه خواهد بود. در ادامه ضمن مروری بر کارهای انجام شده، به معرفی جزئیات VBF خواهیم پرداخت نیز

راحتی حل می‌شود، در زیرآب یک چالش بزرگ است و علت آن کمبود شدید پهناهای باند است. ۳- به طور کلی طراحی و نصب چنین تاسیساتی در زیرآب دشوارتر است. علی‌رغم تمام مطالب ذکر شده پروتکل‌های این دسته محبوبیت زیادی دارند زیرا در بسیاری از کاربردها نداشتن هرگونه ترافیک کنترلی، عاملی است تا راندمان شبکه در سطح بالایی باشد. نمونه شناخته‌شده این دسته VBF [۱] است که بعداً تشریح می‌شود.

- پروتکل‌هایی که ترکیبی از دو دسته فوق باشند، یعنی هم ترافیک کنترلی داشته باشند و هم از یک سیستم خارجی اطلاعات دریافت نمایند: به نظر می‌رسد که بدترین گروه از پروتکل‌ها، همین گروه است زیرا دو ضعف عمده دارند که در شرایط کلی شاید بتوان از یکی در مقابل به دست آوردن دیگری صرف نظر کرد. برخی از پروتکل‌های مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی در این دسته قرار می‌گیرند. یعنی در هر خوشه مستقلاً از نوع ۱ هستند و ارتباط بین سرخوشه‌ها از نوع ۲ است. یک نمونه از این روش الگوریتم AHH-VBF [۱۳] است.

- پروتکل‌هایی که برای مسیریابی از هیچ‌گونه اطلاعات خارجی استفاده نمی‌کنند: تاکنون برای شبکه‌های حسگر زیرآبی پروتکل DBR [۲] معرفی شده است و به نظر می‌رسد که نتوان تحت این شرایط موردی بهتر از آن پیشنهاد داد. مبنای تصمیم‌گیری در این پروتکل مقایسه عمق گره فعلی و قبلی است و اساس تصمیم بر این است که تنها گره‌های با عمق کمتر حق مشارکت دارند. از آنجا که اطلاعات عمق گره‌ها از طریق عمق‌سنج خودشان قابل تامین است و نیاز به اطلاعات خارجی ندارند، گاهی این پروتکل را غیر جغرافیایی/غیر مکان محور می‌گویند و در واقع مستقل از اطلاعات شبکه‌ای است.

سه دسته اول را اصطلاحاً پروتکل‌های مسیریابی جغرافیایی یا وابسته به مکان^۱ گویند. این نکته که هر کدام از آن‌ها دارای دارای ضعفی هستند، به هیچ وجه به معنای نامناسب بودن آن‌ها نیست و ذکر این که تقریباً همه پروتکل‌های بکار گرفته شده جغرافیایی است، این گفته را تایید می‌کند. علت اصلی بکارگیری پروتکل‌های جغرافیایی آن است که هر کاربردی محدودیت و آزادی خاص خود را دارد. در عمده شبکه‌ها خیلی ساده می‌توان

² Reliability/Lifetime Robustness

³ Source Routing Protocol

⁴ Hop by Hop Routing Protocol (Per Hop)

⁵ Greedy

¹ Location-based/Geographical Routing Protocols

سه بعدی زیرآب است که به منظور انتقال بهتر بسته‌های اطلاعاتی در یک شبکه مخابراتی زیرآبی صورت می‌گیرد). پس از آن الگوریتم‌های متعددی از جمله سه روش بحث شده در مرجع [۳] جمع‌بندی شده‌اند. در [۱۱]، [۱۶] و [۲۵] پروتکل‌های مسیریابی با قابلیت اعتماد بالا به منظور بالا بردن مقاومت لینک‌های ارتباطی در برابر قطعی پیشنهاد شده است تا معیارهای کیفیت سرویسی دهی (QoS) بهبود یابد. در مرجع [۲۶]، [۲۰] و [۲۱] بهبود ترافیک شبکه با استفاده از یک الگوریتم مسیریابی چندپخشی پیشنهاد شده است، به‌طور کلی مسیریابی چندپخشی^۱ خود یک زمینه پژوهشی مجزا است و می‌تواند با انجام یک سری تغییرات در پروتکل‌های نظیر پروتکل‌های ذکر شده (بنابراین پروتکل‌هایی مثل VBF را تک‌پخشی گویند) به بهبود کارایی شبکه در کاربردهای با گیرنده گروهی منجر شود. در [۲۸] یک الگوریتم مسیریابی مشابه DBR ارائه شده است که با اضافه کردن شرایطی برای مسیریابی سعی در بهبود پارامترهای شبکه داشته است، بعداً خواهیم دید که اضافه کردن شرایط عضویت در گروه مسیریاب‌ها یک ایده کلی برای بهبود مسیریابی است یعنی بطور کلی می‌توان الگوریتم مسیریابی را یک محدودیت بر جلورانی بسته‌ها به شیوه سیل آسا^۲ در شبکه دانست. در [۲۹] روشی جغرافیایی مبتنی بر تحلیل اطلاعات بازگشتی از همسایگان معرفی شده است، بدیهی است چنین روش‌هایی از اطلاعات محیطی استفاده می‌کنند و ترافیک کنترلی بالایی دارند، اگرچه ممکن است در مجموع عملکرد چنین شبکه‌ای به لحاظ ترافیک و انرژی مناسب باشد ولی وجود بسته‌های کنترلی، امنیت مسیریابی را به خطر می‌اندازد و نیز به ذات انرژی بر و دارای تاخیر طولانی است. لازم به توضیح است که توسعه شبکه‌های زیرآب صرفاً منحصر به شبکه‌های حسگر صوتی که در حالت جامع و قابل تعمیر برای توپولوژی سه بعدی و معماری پویا به کار می‌روند، نیست و شبکه‌های نوری زیرآب [۲۴] نیز هستند که عمدتاً برای شبکه‌های با معماری ایستا و گره‌های نامتحرک مناسب‌اند و البته زیرساخت‌گرا محسوب می‌شوند. این شبکه‌های نوری بصورت ترکیبی با لینک‌های صوتی هم قابل استفاده هستند.

به معرفی برخی از توسعه‌های ایجاد شده برای آن خواهیم پرداخت. این مقاله مشتمل بر ۵ بخش است.

مروری بر کارهای پیشین

با بررسی سوابق پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه شبکه‌های بی‌سیم متحرک بدون زیرساخت مشخص می‌شود که این تحقیقات از سال ۱۹۹۰ میلادی جدی شده است و مسائل مربوط به شبکه‌های صوتی زیرآب از حدود سال ۲۰۰۰ میلادی به بعد جدی‌تر دنبال می‌شود. مهم‌ترین الگوریتم‌های مسیریابی برای این دسته از شبکه‌ها که مورد بحث است در سال‌های ۲۰۰۵ و بعد از آن معرفی شده است که از این بین می‌توان به پروتکل‌های مهم و اساسی VBF، DBR و FBR اشاره کرد [۱]-[۲]، [۲۳] که به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۸ ارائه شده‌اند و کمی پیش‌تر هم از دو مورد نام بردیم. در روش VBF از یک بردار مسیر که به‌صورت جغرافیایی مبداء و مقصد را مرتبط می‌سازد استفاده شده است و در واقع اطلاعات جغرافیایی از یک مرجع خارجی و توسط یک پهنای باند مجزا در اختیار گره‌ها قرار می‌گیرد. بنابراین پروتکل مورد بحث یک پروتکل مسیریابی جغرافیایی است ولی فاقد ترافیک کنترلی است و محدودیتی که این پروتکل بر جلورانی بی‌قید و شرط بسته‌های اطلاعاتی توسط گره‌ها اعمال می‌کند این است که حول بردار مسیر، استوانه‌ای مجازی با شعاع وفق‌پذیر تشکیل می‌دهد و تنها به گره‌های درون استوانه اجازه می‌دهد که در مسیریابی شرکت نمایند، ذکر این نکته ضروری است که این پروتکل به عنوان پروتکل پایه مسیریابی در این تحقیق استفاده شده است و در ادامه مفصل در مورد آن و توسعه‌هایش بحث می‌کنیم. در روش DBR از اطلاعات جغرافیایی محیط استفاده نشده است و صرفاً بر اساس عمق مسیریابی صورت می‌گیرد و محدودیت اعمال شده بر جلورانی در عمل یک نامساوی ساده ریاضی است و این در حالی است که روش FBR یک روش جغرافیایی است که از ایجاد یک پرتو متمرکز و تحت زاویه خاصی گزینش گره برای مسیریابی و دستیابی به مقصد را انجام می‌دهد و در حقیقت این پروتکل هم مشابه دو مورد قبل و خصوصاً VBF است زیرا هر دو محدودیت را به صورت فیزیکی اعمال کرده‌اند (مقصود از ناحیه‌بندی فیزیکی صرفاً یک بخش‌بندی مجازی محیط

¹ Multicast Routing (Geocasting/Mobcasting)

² Flooding Packet Forwarding

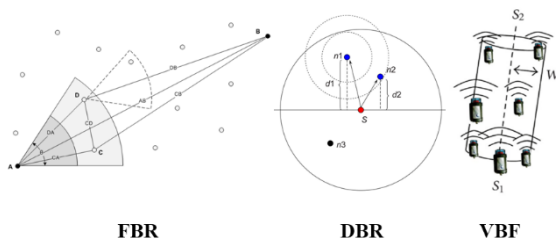
پروتکل VBF

با توجه به خصوصیات منحصر به فرد شبکه‌های حسگر زیرآبی و پارامترهای هدف در یک شبکه بی‌سیم حسگر صوتی، می‌توان گفت که پروتکل VBF به طور نسبی جهت رفع این نیازمندی‌ها طراحی شده است. بردار مسیر معرف برداری است که مبداء را به مقصد متصل می‌نماید. در VBF اطلاعات مربوط به بردار مسیریابی در همه بسته‌ها قرار داده می‌شود و گره‌هایی که به این بردار نزدیک می‌باشند، می‌توانند اقدام به جلورانی این بسته‌ها نمایند. در VBF هر بسته اطلاعاتی می‌بایست جز اطلاعات ارسالی، مکان‌های فرستنده و گیرنده یعنی ابتدا و انتهای بردار (انتهای بردار همان Sink است که از قبل موقعیت مکانیش در اختیار تمام گره‌ها بوده است و اگر شبکه چند Sink داشته باشد و یا گیرنده گره دیگری باشد باید اطلاعات گیرنده غیر منحصر به فرد هم در بسته ارسالی باشد) را در خود حمل نماید و با این اطلاعات و علم به این که از قبل توسط یک سیستم جامع موقعیت-یابی مختصات هر گره در اختیارش قرار گرفته است، بنابراین هر گره می‌تواند با تشکیل بردار مسیریابی برای هر بسته دریافتی، فاصله خود را از آن بردار محاسبه نماید و تصمیم بگیرد که در مسیریابی شرکت کند یا نکند، پس به‌طور خلاصه مسیر ارسال داده با یک بردار مسیریابی از فرستنده به گیرنده مشخص می‌شود. پس از دریافت یک بسته توسط یک گره، آن گره موقعیت نسبی خودش را نسبت به بردار مسیریابی محاسبه می‌کند و نیز به همین ترتیب همه گره‌هایی که بسته را دریافت می‌کنند، موقعیت نسبی خود را محاسبه می‌نمایند و بنابراین اگر معلوم شود که یک گره به اندازه کافی به بردار مسیریابی نزدیک است آنگاه در مسیریابی شرکت خواهد کرد. معیاری که برای تعیین میزان مجاورت نسبی وجود دارد یک نامساوی ساده است که در نهایت منجر به ساخت استوانه مسیر یا مسیریابی^۱ خواهد شد. شکل ۱ استوانه VBF، قیف FBR و نیز محدودیت عمق DBR را به تصویر کشیده است و قابل مشاهده است که اساس هر سه اعمال محدودیت اضافی بر ارسال سیل‌آسای بسته‌ها است. رابطه ۱ به صورت نمادین تولید استوانه را نشان می‌دهد. شکل ۱ اساس این پروتکل را نشان می‌دهد. در این

شکل گره S1 مبداء و گره S2 مقصد است. بردار مسیریابی S1S2 می‌باشد و بسته‌های اطلاعاتی از S1 به سمت S2 ارسال می‌شوند.

$$W \stackrel{\leq}{>} G(i,j) \quad (1)$$

رابطه ۱ نشان می‌دهد که اگر W شعاع استوانه مقداری ثابت در نظر گرفته شود، آن‌گاه برای گره i فاصله از بردار z برابر $G(i,j)$ است و اگر این فاصله کمتر از W باشد، گره مجاز به شرکت در مسیریابی است و در غیر این صورت باید بسته دریافتی را منهدم^۲ نماید. توجه داشته باشید که W و $G(i,j)$ لزوماً فاصله هندسی نیست که در قالب شعاع هندسی استوانه تعبیر شود و می‌تواند یک تابع هزینه برای بهینه‌سازی شرکت کردن یا شرکت نکردن گره‌ها در فرایند مسیریابی باشد، مشخصاً منظور آن است که لزوماً شکل هندسی بدست آمده یک استوانه هندسی نیست و ممکن است W هم تابع i باشد. پس به‌صورت مختصر می‌توان گفت، گره‌هایی که در این استوانه مسیریابی قرار دارند واجد شرایط لازم برای شرکت در مسیر یابی هستند و گره‌هایی که دور از آن‌ها قرار دارند، یعنی در استوانه مسیریابی قرار ندارند نمی‌توانند آن بسته را ارسال نمایند. نکته دیگر آن‌که الگوریتم‌های مسیریابی متعدد همگی بر این اصل استوار هستند که با ایجاد یک محدودیت هدفمند جلوی شرکت همه گره‌ها جز موارد ضروری را بگیرند تا رسیدن به مقادیر مناسب‌تر برای پارامترهای هدف ممکن شود. در این میان روش‌های مختلف هریک به طریقی سعی در انتخاب گره‌های ارجح دارند و روشی موفق‌تر است و یک مسیریابی بهینه شناخته می‌شود که انتخاب‌های مناسب‌تری داشته باشد.



شکل (۱) اعمال محدودیت در سه روش مسیریابی VBF، FBR و DBR [۱،۲ و ۲۶]. هر سه پروتکل با اعمال یک شرط منطقی، تنها به گره‌های موقعیت بهتر اجازه می‌دهند در مسیریابی شرکت نمایند. مثلاً در DBR گره $n1$ به علت عمق

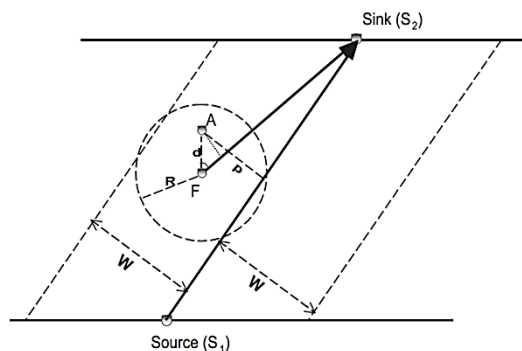
¹ Path Cylinder (Routing Cylinder/Routing Pipe)

² Discard

عملکرد خود را تصحیح کند عاملی است تا دارای ویژگی مقیاس پذیری^۲ و عملکرد وفقی باشد و وفقی شدن نیز یک راه دیگر برای ایجاد الگوریتم‌های حریصانه است. فاکتور نامطلوب جهت اندازه گیری میزان مطلوبیت یک گره برای ارسال بسته به وجود آمده است. به صورت فرضی بردار مسیریابی S1S2 را در نظر می‌گیریم و برای گره جلوراندنده فاکتور نامطلوب α چنین تعریف می‌شود.

$$\alpha = \frac{p}{W} + \frac{(R-d \cos \theta)}{R} \quad (2)$$

در رابطه ۲ که محاسبات برای گره هدف A انجام شده است، p فاصله گره A تا بردار مسیر یابی S1S2 می‌باشد. برای آنکه گره A قادر باشد محاسبه فوق را انجام دهد لازم است تا گره‌های میانی یا مسیریاب‌ها اطلاعات مکانی خود را هم در بسته ارسالی قرار دهند. البته این مساله به طور کلی در پروتکل وجود دارد ولی صرفاً در محاسبات این بخش ضروری است. R شعاع ارسال را نشان می‌دهد، d فاصله بین گره ارسال کننده F و گره A است، θ زاویه بین بردار FA و FS_2 است و $R - d \cos \theta$ در حقیقت تفاضل شعاع ارسال و تصویر مکان A روی شعاع ارسال را نشان می‌دهد و در نهایت W شعاع استوانه مسیریابی است (شکل ۲).



شکل (۲) نحوه عملکرد الگوریتم خود تطبیقی در VBF [۶]

رابطه ۲ نشان می‌دهد که اگر فاکتور نامطلوب α مقدار بزرگی داشته باشد، بهتر است گره A در مسیریابی شرکت نکند و علت آن یا دوری آن گره از بردار مسیریابی است و یا این که موقعیتش از مسیریاب قبلی یعنی گره F بهتر نیست و شرکت گره A سودمند نخواهد بود. این حقایق از دو بخش کسری جمع‌شونده در رابطه ۲ دریافت می‌گردد.

کمتر موقعیت بهتری در جهت نزدیکی به مقصد دارد و لذا کافی است تنها به این گره اجازه فعالیت به عنوان مسیریاب دهیم

الگوریتم خود تطبیقی در VBF

در پروتکل VBF همه گره‌هایی که به اندازه کافی به بردار مسیریابی نزدیک می‌باشد، برای جلورانی بسته انتخاب می‌شوند و علت الگوریتم ساده پروتکل است. با توجه به درگیر نبودن بسیاری از گره‌های شبکه در مسیر یابی، این پروتکل در بحث مصرف انرژی بهینه است، اما مشکلی که مطرح شده است در خصوص مصرف انرژی، تعریف کلی گره‌های مسیر ارسال است که به تراکم توجهی ندارد و صرفاً به خاطر موقعیت مکانی مناسب تمام گره‌ها حتی در یک محدوده متراکم (بخاطر پویایی توپولوژی و تحرک تصادفی گره‌ها امکان دارد که به صورت لحظه‌ای ناهمگنی در تراکم نواحی مختلف ایجاد شود که مدلسازی ریاضی آن بسیار مشکل است و لذا اجباراً یا از این موضوع صرف نظر می‌شود و یا به عنوان یک مساله با پیچیدگی بالا صرفاً به شبیه‌سازی محدود می‌شود، البته در شبکه‌های تنک که ناهمگنی لحظه‌ای بیشتر در دسترس می‌شود، تمهیدات شهودی مبتنی بر اثبات صرفاً شبیه‌سازی اغلب ارائه می‌شود) نیز عضو گروه ارسال کننده بسته می‌شوند و در واقع این برای مصرف انرژی مضر است و باید با اضافه کردن فرایند هوشمندسازی به این پروتکل که به الگوریتم خود تطبیقی^۱ معروف است، سعی شود مصرف انرژی بهینه‌تر شود و گره‌های کمتری در مسیریابی شرکت نمایند. در واقع الگوریتم خود تطبیقی یک سیستم کنترلی هوشمند است که باعث می‌شود مقدار W به صورت پویا متناسب با تراکم‌های مختلف انتخاب شود تا در مکان‌هایی که تراکم بالا است W به صورت مجازی کاهش یابد و نیز اگرچه در این تحقیق تراکم کم مورد بررسی قرار نمی‌گیرد ولی الگوریتم خود تطبیقی در این حالت هم W را افزایش می‌دهد تا کمبود مسیریاب‌ها جبران شود. در الگوریتم برای این منظور، ابتدا یک فاکتور نامطلوب تعریف می‌شود و بعد اثر این فاکتور روی مقدار W منجر به بزرگ و کوچک شدن استوانه و در نتیجه فضای انتخاب مسیریاب‌ها خواهد شد. این ویژگی پروتکل که قادر است به صورت وفقی با تراکم‌های مختلف

² Scalable

¹ Self-Adaptation

در مسیریابی شرکت می‌کنند (با این فرض که مجاز به مشارکت باشند و بسته دریافتی را قبلاً مسیریابی نکرده باشد). در رابطه ۳ نحوه محاسبه این مدت زمان مشاهده می‌شود. به طور کلی علت ایجاد تاخیرهای متفاوت در گره‌های دریافت کننده مختلف، ایجاد شرایطی است که تصادم کمتر رخ دهد. مساله تاخیر تعامدی در پروتکل‌های لایه‌های مختلف قبلاً هم وجود داشته است. اغلب دیده شده است که گره‌های میانی مدت زمان تصادفی صبر می‌کنند و بعد تصمیم به مشارکت یا عدم مشارکت در مسیریابی می‌گیرند، نکته جالب آن است که این منطق شهودی در شبیه‌سازی‌ها خود را مؤثر نشان داده است و لذا پیشنهاد دهندگان الگوریتم خود تطبیقی این بخش را هم به الگوریتم خود اضافه کرده‌اند.

در رابطه ۳، $T_{adaptation}$ زمان تطبیق نامیده شده است و T_{delay} حداکثر تاخیر از پیش تعریف شده برای شبکه است و در واقع یک پارامتر آزاد هم تلقی می‌شود که تا حدی الگوریتم را مقیاس پذیر می‌کند ولی وجود بخش ثابت غیرصفر در این رابطه عاملی است که در حالت تنک که به تمام گره‌ها و آن هم بدون تاخیر عمدی نیاز داریم، این مقیاس پذیری دارای اشکال باشد (مقصود عبارت $\frac{R-d}{1500}$ است). نحوه تعریف زمان تطبیق به گونه‌ای است که یک رابطه مستقیم غیرخطی با عامل نامطلوب دارد. اساس تعریف رابطه ۳ نیز مانند رابطه ۲ که جزئیات آن تشریح شد، منطقی است زیرا: ۱- برای گره‌های مختلف زمان تطبیق یکسان نیست، یعنی α و d برای هر گره متفاوت است ۲- برای مثال اگر در محل کنونی دریافت کننده، تراکم گره‌ها بالا باشد، آن‌گاه عامل نامطلوب مقدار بزرگی دارد و در نتیجه زمان تطبیق هم مقدار بزرگتری برای آن گره خواهد بود. این به آن معناست که اگر در لحظه‌ای تراکم بخشی از شبکه بالا باشد، گره مدت زمان بیشتری صبر می‌کند تا بر اثر پویایی توپولوژی شبکه، آن بخش تنک‌تر شود. اگر صبر کند و بشنود که آن بسته دریافتی (هر بسته شناسه خاص دارد، مبتنی بر: ۱- شماره ترتیب در فرستنده اصلی ۲- شماره گره فرستنده اصلی) توسط گره دیگری مسیریابی شده است، بعد از اتمام زمان تطبیق دیگر لازم نیست آن گره در مسیریابی مشارکت نماید و بدین شکل بسیاری از ارسال‌های موازی

از این گفته متوجه می‌شویم که در واقع W کماکان مقداری ثابت است ولی با ایجاد یک تاخیر هوشمند مبتنی بر α (که به زمان تطبیق موسوم است) گره‌های میانی دریافت کننده برای تصمیم‌گیری خود علاوه بر W به مقدار α هم توجه می‌کنند (تصمیم صرفاً مبتنی بر W اتخاذ می‌شود) و در عمل مثل آن است که W به صورت پویا با تراکم تغییر می‌کند و در حقیقت بجای آنکه W متناسب با تراکم شود، تراکم متناسب W می‌شود (چرا که تراکم نواحی می‌تواند با زمان عوض شود) و بنابراین هر گره به صورت پویا و در لحظه تصمیم‌گیری می‌کند. این الگوریتم مصداق یک الگوریتم حریصانه است (پس بر خلاف برخی از پروتکل‌های مسیریابی مبداء که در بسته اطلاعاتی تمام مسیریاب‌ها تعیین می‌شوند، VBF را نیز می‌توان به تنهایی حریصانه دانست، زیرا هر گره میانی خود تصمیم می‌گیرد).

در شکل ۳-ب نحوه بهبود عملکرد شبکه تحت الگوریتم خود تطبیقی در جهت مصرف انرژی دیده می‌شود، در این نمودار پروتکل قبل و بعد از اعمال خود تطبیقی رصد شده است. البته شبیه‌سازی نشان داده است که خود تطبیقی اگرچه در کاهش مصرف انرژی بسیار مؤثر است ولی بر خلاف انتظار روی ترافیک شبکه اندکی تاثیر منفی دارد. شکل ۳-الف نشان دهنده وضعیت ترافیکی یک شبکه مبتنی بر VBF در شرایط اعمال و عدم اعمال خود تطبیقی است (نرخ موفقیت معادل PDR است). در پایان لازم به توضیح است که خود تطبیقی پیشنهادی بهبود دهنده در جهت بهبود طول عمر شبکه و قابلیت اعتماد آن است که برای کاربردهای غیر حساس به ترافیک بیان شده است. این بهبود توسط خود پیشنهاد دهندگان VBF در سال ۲۰۰۶ ارائه گردید [۱] ولی جزئیات آن و نحوه تاثیر آن بر انرژی و ترافیک در سال ۲۰۱۰ بیان گردید [۵]. امروزه وقتی از VBF سخن می‌گوییم، منظور VBF به همراه الگوریتم خود تطبیقی است و به نحوی مثل این است که خود تطبیقی یک مساله ذاتی در VBF است (این مساله طبیعی است، زیرا بسیاری از پژوهشگران حوزه مخابرات زیرآب، مصرف انرژی را مهم ترین مشکل یک شبکه حسگر زیرآبی می‌دانند).

الگوریتم VBF یک الگوریتم شهودی است، یکی از مصداق‌های این امر مدت زمانی است که گره‌های میانی پس از دریافت بسته صبر می‌کنند و سپس در صورت نیاز

مختلف و تحرک‌های مختلف بهبود قابل ملاحظه‌ای داشته است.

علت مشاهده چنین تاثیری بیشتر به صحیحتر تعریف شدن گره‌های مجاز برای مسیریابی مربوط می‌شود، زیرا برای مثال اگر استوانه ثابت بماند و گرهی که دورتر از محور استوانه است قرار باشد در مسیریابی شرکت کند، بیش از نیمی از همسایگان خود را که می‌توانستند به فرایند مسیریابی کمک نمایند، از دست می‌دهد و این در حالیست که در حالت استوانه پویا، آن گره دقیقاً روی محور استوانه خود خواهد بود. این دستاورد با بدتر شدن مصرف انرژی همراه شده است که علت آن هم تقریباً بدیهی است، چرا که با نگاهی ساده به شکل ۳ واضح است در حالت استوانه پویا، حجم بیشتر و لذا تعداد گره بیشتری مجاز به شرکت در مسیریابی خواهند بود و این مساله مصرف انرژی را افزایش می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت پروتکل HH-VBF برای کاربردهایی که طول عمر شبکه مهم‌تر است، مناسب نیست.

به طور کلی VBF یکی از متداول‌ترین پروتکل‌ها در شبکه‌های حسگر صوتی است و نسخه‌های متعددی از آن که دارای ویژگی‌های جدیدی نیز هستند، معرفی شده است [۴۱]-[۳۹]، [۱۸]، [۱۷]، [۱۴]، [۱۳]، [۶]. شاید به جرئت بتوان گفت که یکی از اصلی‌ترین دلایل توجه به این پروتکل در بین پژوهشگران، پیاده‌سازی این پروتکل در نسخه توسعه دهنده نرم افزار NS-2 است که تحت نام Aqua-Sim شناخته می‌شود. امروزه این پروتکل، بیشتر به صورت یک پروتکل پایه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد و نسخه‌هایی از آن جهت اهداف گوناگون تولید شده است. برای مثال پروتکل اصلی، یک پروتکل تک گیرنده^۱ است ولی در حال حاضر نسخه‌های چند گیرنده^۲ هم برای آن پیشنهاد شده است.

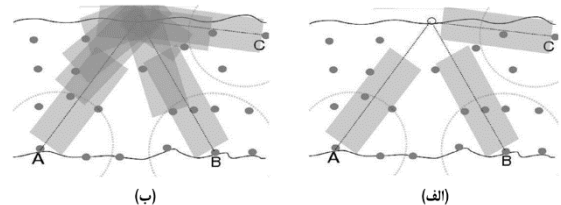
تا اینجا مروری اجمالی بر پروتکل‌های مسیریابی زیرآبی داشتیم و خصوصاً DBR، FBR و نیز VBF و برخی توسعه‌های آن را بررسی کردی و هم اکنون باید تحلیلی بنیادی بر پروتکل‌های مسیریابی داشته باشیم و هدف بررسی سیر تحولی پروتکل‌ها در جهت رسیدن به یک رهیافت کلی و شرایطی است که مصرف انرژی یک عنصر کلیدی است.

و چندمسیری حذف شده و در مصرف پهنای باند و انرژی صرفه جویی می‌شود.

$$T_{adaptation} = \sqrt{\alpha} \times T_{delay} + \frac{R-d}{1500m/s} \quad (3)$$

پروتکل HH-VBF

پروتکل HH-VBF نوع گره به گره برای VBF است که در [۵] پیشنهاد گردید. این پروتکل به این صورت عمل می‌کند که استوانه مسیریابی به صورت استاتیک و دائمی نیست و در واقع هر گره میانی مرتباً این استوانه را به روز می‌کند. قبلاً مشاهده شد که استوانه دائم از فرستنده در کف آب تا تنها Sink ایجاد می‌شد و مسیریابی بر مبنای آن انجام می‌شد، حال تفاوتی که بوجود آمده است، آن است که هر گیرنده میانی بر مبنای شرایط قبلی و استوانه موجود تصمیم می‌گیرد که در مسیریابی شرکت کند یا نکند، اگر تصمیم مثبت باشد، آن گره بسته را پیش‌رانی می‌کند ولی استوانه مسیریابی عوض می‌شود و گره دریافت کننده بعدی بر مبنای استوانه‌ای که گره قبلی شروع آن و Sink انتهای آن است، تصمیم می‌گیرد که در فرایند مسیریابی شرکت کند.



شکل (۳) مقایسه روند دائمی و پویا در ایجاد استوانه

مسیریابی برای دو پروتکل VBF و HH-VBF [۵]. روند دائمی و پویا در پروتکل FBR هم که ذاتاً مسیریابی از نوع مبدا است و نیز نوع محدودیت، فیزیکی است به راحتی قابل اجرا است و دقیقاً چنین تصاویری قابل رسم است ولی به این نکته توجه داشته باشیم پروتکل DBR ذاتاً پروتکل گره به گره است و لذا همواره محدودیت خود را مانند شکل (ب)

اعمال می‌کند [۵]

همان طور که مطالعه شده است به علت به روز رسانی استوانه مسیریابی، ترافیک شبکه (در این ارزیابی انجام شده، تاخیر شبکه مطالعه نشده است و لذا نتیجه برای کاربردهای غیرحساس به تاخیر معتبر است) در تراکم‌های

¹ Single-Sink

² Multi-Sink

مسیریابی به عنوان ارسال سیا آسای بهینه

در مطالب پیشین با مفهوم مسیریابی مبداء و گره به گره آشنا شدیم. باید بدانیم که این مفاهیم کلی بوده و حتی نه فقط در تمام شبکه‌های بی‌سیم حسگر، بلکه در همه شبکه‌ها اعم از شبکه‌های هدایت شده سیمی و نوری (اینترنت) هم معنی دار است. دو پروتکل معروف و استاندارد شده برای شبکه اینترنت OSPF و RIP نام دارند که به ترتیب از نوع مسیریابی مبداء و گره به گره هستند. آزمایش‌ها در چند دهه پیش نشان داده که پروتکل RIP در شبکه‌های هدایت شده ضعیف‌تر ظاهر شده است و ضمناً انتخابش برای کوتاه‌ترین مسیر (معیار کوتاه‌تر بسته به نوع سیاست کیفیت سرویس دهی متغیر است، اغلب تعداد مسیریاب را به عنوان معیار هزینه در نظر گرفته‌اند) اغلب دور از حالت بهینه برای تحقق بهترین وضعیت ترافیکی بود و به همین دلیل پروتکل OSPF پیشنهاد گردید. این پروتکل از مفهومی به نام مسیریابی^۱ LS استفاده می‌کرد که بهینه‌گی مناسبی جهت انتخاب کوتاه‌ترین مسیر داشت. مفهوم LS ایجاب می‌کرد که پروتکل اولاً از نوع مسیریابی مبداء باشد و ثانیاً به جای انتخاب‌های ساده RIP که زیر بهینه بود (پروتکل‌های مسیریابی گره به گره از مفهومی به نام DV^۲ تبعیت می‌کنند که در مقابل LS قرار می‌گیرد)، از یک الگوریتم مناسب کوتاه‌ترین مسیر را انتخاب نماید. در مورد OSPF از الگوریتم گرافی Dijkstra استفاده شد که این دو تغییر مفهومی (یعنی الگوریتم بهتر برای پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر و نیز مسیریابی مبداء بجای گره به گره که در RIP انجام می‌شود) در نهایت برتری را برای OSPF به ارمغان آورد و حتی امروزه این پروتکل در شبکه‌های مخابراتی دارای کاربرد فراوان است. زمانی که توسعه شبکه‌های بی‌سیم اقتضائی و حسگر به صورت جدی مطرح گردید، الگوریتم‌هایی مثل OSPF با توجه به ماهیت ذاتی خود که برای شبکه‌های سیمی طراحی شده بوده در این شبکه‌های بی‌سیم که دو تفاوت بنیادی با شبکه‌های سیمی داشتند، مناسب نبودند (دو تفاوت عمده: ۱- توپولوژی شبکه‌های سیمی/انترنت عمدتاً - و نه الزاماً - در سطح شبکه‌های محلی، ترکیبی از توپولوژی

گراف ستاره‌ای و سلسله مراتبی بود - و در نهایت گراف شبکه درختی شکل می‌شود، البته باید گفت معنای این گفته چنین نیست که در معماری اینترنت، حلقه وجود ندارد، بلکه ساده‌ترین شکل برقرای ارتباط که دست کم یک مسیر را بین هر دو نقطه تضمین می‌نماید، درخت ناشی از توپولوژی ستاره‌ای و سلسله مراتبی است، ضمن این که گاهی به دلیل اتصال چند شبکه به یکدیگر و حتی به صورت تعامدی برای وجود لینک‌های پشتیبانی، در گراف شبکه ممکن است حلقه وجود داشته باشد که الگوریتم‌های مسیریابی نامبرده وظیفه پیدا کردن مسیر با بهترین هزینه را مطابق معیارهای خود دارند و این در حالی است که شبکه‌های بی‌سیم جدید از توپولوژی مش^۳ یا حلقه استفاده می‌کنند که مشبک هم گفته می‌شود و در این توپولوژی، حالت دارای بیشترین اتصالات نظیر به نظیر به یک گراف کامل بدل می‌شود که البته در این حالت دیگر مسیریابی لازم نیست و این موضوع حل شده است. ۲- شبکه‌های بی‌سیم جدید بر خلاف شبکه‌های سیمی، می‌توانستند متحرک باشند). اما این محدودیت‌ها به معنی دور انداختن OSPF نبود، بلکه سعی شد که با تغییراتی در ساختار OSPF نسخه تخصصی شبکه‌های اقتضائی و حسگر تولید شود. تغییراتی که ایجاد کردند عبارت اند از:

۱- با توجه به این که سیاست مبتنی بر جدول دائمی^۴ که کارآمدی خاصی در شبکه‌های سیمی داشت، به مانع ساختاری در شبکه‌های اقتضائی و حسگر تبدیل شده بود، این مساله را در پروتکل جدید لحاظ نکردند و بجای آن از سیاست انفعالی^۵ (جدول غیر دائم) استفاده کردند و علت اصلی آن پویایی توپولوژی بی‌سیم بود که باعث می‌شد جداول خیلی زود فاقد اعتبار شوند و بنابراین اگر قرار باشد جداول دائماً موجود باشند، مستلزم آن است که در فواصل زمانی منظم، آنها را بروز رسانی کنیم و پر واضح است که این مساله چقدر وضعیت ترافیکی شبکه را خصوصاً در تراکم متوسط و بالا آشفته می‌کند.

۲- اجرای الگوریتم Dijkstra زمان بر بود و در شرایطی که توپولوژی مداوم در حالت تغییر بود، این الگوریتم در زمانی که کشف مسیر منتهی می‌شد که دیگر آن توپولوژی

³ Mesh

⁴ Table Driven/Proactive

⁵ On-Demand Driven/Reactive

¹ Link State

² Distance Vector

هر حال مستلزم جابجایی بسته‌های کنترلی بود و تاخیر ناشی از این پردازش‌ها در سرعت بالای تغییرات توپولوژی شبکه مشکل ساز می‌شد (قبلا به معایب وجود بسته‌های کنترلی اشاره کردیم، این بسته‌ها در هر شبکه مخابراتی اعم از سیمی و بی‌سیم و در هر لایه‌ای که باشند می‌توانند امنیت شبکه را به خطر بیندازند و به صورت موردی بر ترافیک (نرخ تحویل و تاخیر سراسری) و مصرف انرژی هم اثر نامطلوب داشته باشند ولی بخش دوم لزوماً همه جا برقرار نیست). ذکر این نکته ضروری است که بدانیم تشکیل جدول مسیریابی در هر دو نوع مسیریابی با جدول دائمی و جدول انفعالی انجام می‌شود و نیز در هر دو نوع مسیریابی مبداء و گره به گره قابل انجام است و تنها تفاوت این است که در مواردی که پروتکل‌های مسیریابی مبداء جدول تشکیل می‌دهند، این جدول مفصل‌تر است و با حجم ترافیکی و تاخیر بیشتری همراه است و به این لحاظ وضع پروتکل‌های دارای جدول مسیریابی انفعالی که گره به گره هستند، بهتر است. در زیرآب چون تاخیر ذاتی کانال وجود دارد، مشکل به شکل ملموس‌تری بروز می‌کند تا جایی که اساساً استفاده از جدول مسیریابی توصیه نمی‌شود. سوالی که در این مقطع پیش می‌آید این بود که اگر جدول مسیریابی نداشته باشیم، پس مسیریابی و مساله کشف مسیر چگونه تحقق پیدا می‌کند؟ (در پروتکل‌های مبتنی بر تشکیل جدول مسیریابی دینامیک دو فاز کلی دارد: ۱- کشف مسیر^۲ ۲- تصحیح و نگهداری مسیر^۳، بدیهی است روش‌هایی که جدول دائم ندارند، فقط فاز اول را انجام می‌دهند و بدون هرگونه بروز رسانی هر وقت لازم باشد به کشف مسیر می‌پردازند)، در پاسخ به این سوال محققین مجدداً به مرور نحوه ایجاد پروتکل‌های مسیریابی پرداختند و راه حل را یافتند. واقعیت آن است که پروتکل‌های قدیمی‌تر که از نوع مسیریابی مبداء بودند و نیز مبتنی بر تشکیل جدول، مانند OSPF، قبل از شروع فازهای مسیریابی از یک پیش مسیریابی تحت عنوان شناخت توپولوژی مبتنی بر الگوریتم سیل^۴ استفاده می‌کردند (مسیریابی‌های گره به گره به دلیل این که جدول خود را مبتنی بر اطلاعات محلی و با استفاده از تعداد محدودی از همسایگان و نیز بسته‌های

فاقد اعتبار بود، مخصوصاً در تحرک‌های بالاتر وضعیت ترافیکی بسیار نامطلوب می‌شد. لذا بجای Dijkstra از مفاهیم ساده‌تری که زیر بهینه بودند، استفاده شد و این مشکل هم مرتفع گردید، یعنی تغییر حاصل در مقایسه با Dijkstra در شرایط خاص این شبکه‌ها، موفق‌تر بود، زیرا تاخیر بسیار کمتری در پردازش‌های مربوط به کشف مسیر داشت. به طور کلی عدم استفاده از Dijkstra باعث شد تا کشف مسیر زیر بهینه شباهت زیادی به کارکرد RIP داشته باشد و در نهایت پروتکل حاصل بجای آن که مسیریابی مبداء شود، گره به گره باشد و از مفهوم DV پیروی نماید (این مساله همچنین نشان داد که به سرعت محققین متوجه تناقض ذاتی این دو نوع شبکه شدند و سراغ طرحی رفتند که در شبکه‌های سیمی شکست خورده بود).

پروتکل حاصل را AODV^۱ نامیدند (شکل ۴) و شاید بتوان گفت معروف‌ترین پروتکل مسیریابی در شبکه‌های بی‌سیم اقتضائی و حسگر است. تا همین جا پیروزی بزرگی بدست آمده بود یعنی با اصلاح پروتکل‌های سیمی، نسخه‌های بی‌سیم و با قابلیت بالا تولید شده بود اما این مساله دوام زیادی نداشت، زیرا پس از مدتی متوجه عدم توجه به یک تفاوت ساختاری دیگر شدند که این بار مساله به مراتب پیچیده‌تر بود و علت آن بود که علی‌رغم تمام اصلاحات باز هم پروتکل در تراکم‌های بالا و مهم‌تر از آن در تحرک‌های بالا و در شرایط تاخیر زیاد کانال، عملکرد ترافیکی بسیار ضعیف داشت. بعد از بررسی این تفاوت هم آشکار شد، طبق این تحلیل شبکه‌های بی‌سیم اقتضائی و حسگر اساساً در تحرک بالا با مسیریابی‌هایی که جدول مسیریابی تشکیل می‌دهند به نتیجه مطلوبی نمی‌رسیدند زیرا هر چقدر هم از پروتکل‌های مسیریابی مبداء دوری کنیم و نیز الگوریتم‌های کشف مسیر (کشف مسیر در پروتکل‌های ابتدائی کاملاً مبتنی بر تشکیل جدول مسیریابی بود، لازم است بدانیم اوایل از AODV که به صورت سه بعدی تعمیم یافته بود در زیرآب هم استفاده می‌شد) دارای پیچیدگی محاسباتی کمتری باشند و لذا تاخیر کمتری در محاسبات داشته باشند ولی باز هم در مقابل تحرک بالا، عملکرد ترافیکی مناسب ندارند. این مساله که پروتکل‌ها جدول مسیریابی ایجاد می‌کردند در

² Route Discovery

³ Route Maintenance

⁴ Flooding Algorithm

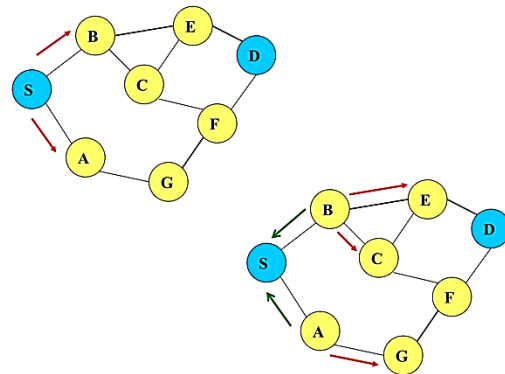
¹ Ad Hoc On-demand Distance Vector (AODV)

الگوریتم سیل آسا از حدود سال ۲۰۰۵ به بعد به عنوان یک اصل تلقی شد و از آن به بعد عمده پروتکل‌های ارائه شده بر این مبنا بود (نه همه، در برخی کاربردهای خاص انواع دیگر هم دیده شده است) و در این میان ابتکارهای ارائه شده تنها در شکل اعمال محدودیت‌ها بوده است و در این میان پروتکلی موفق‌تر بود که محدودیت بهتر و هدفمندتری بر شبکه اعمال می‌کرد. در پایه طراحی پروتکل‌ها هیچ محدودیتی در نظر گرفته نشده است و هر پروتکلی خود وظیفه دارد تمام محدودیت را لحاظ کند، برای مثال در پروتکل DBR علاوه بر شرط نامساوی عمق که دستاورد اصلی آن است برای جلوگیری از تکرار بسته‌ها، اطلاعات بسته‌های ارسال شده تا تعداد ۱۰۰ بسته در حافظه مسیریاب نگهداری می‌شود ولی اغلب پروتکل‌ها محدودیت طول عمر را لحاظ نمی‌کنند (بر خلاف پروتکل‌های مسیریابی در شبکه‌های سیمی). بنابه آنچه بیان گردید این جمله که مسیریابی بر پایه الگوریتم سیل آسا نوع جدیدی از مسیریابی است و در مقابل دو نوع دارای جدول مسیریابی قرار می‌گیرد، صحیح است و به طور کلی می‌توان چنین گفت که: مسیریابی یک ارسال سیل آسای بهینه است. همچنین باید گفت که در پروتکل‌های مسیریابی مبتنی بر الگوریتم سیل آسا چون جدول مسیریابی وجود ندارد، مرحله تصحیح مسیریابی هم معنا ندارد، زیرا این مرحله در جهت تصحیح جدول از اعتبار ساقط شده انجام می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ابتدا تاریخچه تحقیقات مربوط به شبکه‌های حسگر صوتی زیرآبی و برخی مفاهیم آن را بیان کردیم و در ادامه مروری بر سیر تحولات روش‌های مسیریابی انرژی مبنا برای شبکه‌های حسگر صوتی زیرآبی داشتیم. پیداست که نحوه طراحی کارآمدتر محدودیت‌های فیزیکی یک مساله بهینه‌سازی است که عمدتاً به واسطه راهکارهای شهودی قابل حل خواهد بود. هر قدر یک روش مسیریابی بتواند در کاهش مصرف انرژی گره‌های حسگر زیرآبی بیشتر موثر باشد تا آن گره‌ها بیشتر زنده بمانند، طول عمر شبکه افزایش یافته و مدت بیشتری می‌تواند به تبادل بسته‌های اطلاعاتی بپردازد.

کنترلی کمتری انجام می‌دهند، اغلب نیازی به استفاده از الگوریتم سیل آسا ندارند).



شکل (۴) نحوه کشف مسیر در AODV. هر گره در لحظه اطلاعاتی از همسایگان خود را از طریق پرس و جو به دست آورده و جدول مسیریابی موقت و با دید محلی و گره به گره (و نه جامع مانند OSPF) ایجاد می‌کند

الگوریتم سیل آسا همواره به دلیل ترافیک سنگین خود نکوهش شده است و فقط بالاجبار و در حداقل دفعات برای مسیریابی اجرا می‌شود. در الگوریتم سیل آسا هر بسته ارسال مرتباً توسط گره‌های شبکه (مسیریاب‌ها) باز ارسال می‌گردد تا بالاخره پیام به تمام اعضای شبکه برسد. از جمله مشکلات آن، دو پدیده مخرب ترافیکی تکرار بسته‌ها و حتی بدتر از آن حلقه بسته مکرر است. البته در همان شبکه‌های قدیمی اینترنت با تعریف محدودیت طول عمر و سیاست عدم ارسال مجدد تا حد زیادی از ترافیک نامطلوب الگوریتم سیل آسا جلوگیری شده است ولی با این حال باز هم در حد یک پیش مسیریابی از آن استفاده می‌شود. پاسخی که محققین یافتند این بود که با توجه به این که الگوریتم سیل آسا جدول مسیریابی ندارد (اساساً به همین دلیل برای پیش مسیریابی از آن استفاده می‌شد)، شاید بتوان از آن برای مسیریابی اصلی استفاده کرد. این گفته به این معنا است که بجای آن که روش سیل آسا مقدمه‌ای بر مسیریابی و ایجاد جداول باشد، هسته اصلی مسیریابی باشد. با این حال این پرسش همچنان مطرح بود که معایب الگوریتم سیل آسا و بار ترافیکی سنگین آن چه می‌شود و پاسخ این بود که محدودیت‌های هدفمند و جدیدی بر آن چنان اعمال کنیم که ترافیک آن هدفمند شود و سربار ترافیکی آن به حداقل برسد. برای شبکه زیرآبی این سیاست جدید یعنی طراحی پروتکل بر مبنای

منابع

- Underwater Wireless Sensor Networks: A Clustering Approach, in: Proceedings of the Tenth International Conference on Wireless and Mobile Communications, pp. 98-104, 2014.
- [15] M. R. Khosravi, H. Basri, H. Rostami, Improvement of Energy Consumption in Dense Underwater Sensor Networks, in: Proceedings of 2nd International Congress of Electrical Engg., Computer Science and Information Tech., Tehran, Iran, 2015.
- [16] S. Cai, Z. Gao, D. Yang, N. Yao, A network coding based protocol for reliable data transfer in underwater acoustic sensor, Ad Hoc Networks 11 pp. 1603-1609, 2013.
- [17] P. Feng, D. Qin, P. Ji, M. Zhao, R. Guo, T. M. Berhane, Improved energy-balanced algorithm for underwater wireless sensor network based on depth threshold and energy level partition, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019, vol 2, No 228.
- [18] M. Pouryazdanpanah, M. Anjomshoa, A. Salehi, A. Afroozeh, M. Moshfegh, DS-VBF: Dual Sink Vector-Based Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Network, in: Proceedings of 5th Control and System Graduate Research Colloquium, Malaysia, 2014.
- [19] M. R. Khosravi, H. Basri, H. Rostami, Routing with using Vector-Based Forwarding in Underwater Wireless Sensor Networks, in: Proceedings of 2nd International Congress of Electrical Engg., Computer Science and Information Tech., Tehran, Iran, 2015.
- [20] S. K. Dhurandher, M. S. Obaidat, M. Gupta, An efficient technique for geocast region holes in underwater sensor, networks and its performance evaluation, Simulation Modelling Practice and Theory 19, pp. 2102-2116, 2011.
- [21] S. K. Dhurandher, M. S. Obaidat, M. Gupta, Energized geocasting model for underwater wireless sensor networks, Simulation Modelling Practice and Theory 37, pp. 125-138, 2013.
- [22] I. F. Akyildiz, D. Pompili, T. Melodia, State-of-the-Art in Protocol Research for Underwater, Acoustic Sensor Networks, ACM WUWNet'06, Los Angeles, California, USA, September 25, 2006.
- [23] J. M. Jornet, M. Stojanovic, M. Zorzi, Focused beam routing protocol for underwater acoustic networks. Proceedings of the 3rd International Workshop on Underwater Networks, San-Francisco, USA, 2008.
- [24] L. J. Johnson, R. J. Green, M. S. Leeson, Hybrid underwater optical/acoustic link design, , 16th IEEE International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), pp. 1 - 4, 2014.
- [1] P. Xie, J. Cui, L. Lao, VBF: vector-based forwarding protocol for underwater sensor networks, in: Proceedings of international IFIP conference, pp. 1216-1221, 2006.
- [2] H. Yan, Z. Shi, J. Cui, DBR: depth-based routing for underwater sensor networks, in: Proceedings of the 7th international IFIP-TC6 networking conference on adhoc and sensor networks, 2008.
- [3] M. Ayaz, I. Baig, A. Abdullah, I. Faye, A survey on routing techniques in underwater wireless sensor networks, J. Network and Computer Applications 34, pp. 1908-1927, 2011.
- [4] H. Priyadarshi, B. Gupta. A. Anurag, Wireless Sensor Networks Deployment: A Result Oriented Analysis, Wireless Personal Communications, 2020, No. 4, pp 20-27.
- [5] N. Nicolaouy, A. See, P. Xie, J. Cui, D. Maggiorini, Improving the Robustness of Location-Based Routing for Underwater Sensor Networks, IEEE, 2007.
- [6] P. Xie et al., Efficient vector-based forwarding for underwater sensor networks, Hindawi Publishing Corporation, 2010.
- [7] P. Xie et al., Aqua-Sim: an NS-2 based simulator for underwater sensor networks, in: Proceedings of the OCEANS, 2009.
- [8] F. Banaeizadeh, A. T. Haghghat, An energy-efficient data gathering scheme in underwater wireless sensor networks using a mobile sink, International Journal of Information Technology, 2020, vol 12, pp513-522.
- [9] J. G. Proakis, J. A. Rice, E. M. Sozer, M. Stojanovic, Shallow water acoustic networks, IEEE Comm. Mag. 39 (11), pp. 114-119, 2001.
- [10] D. Niculescu and B. Nath, Trajectory based forwarding and its applications, in: Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM'03), San Diego, Calif, USA, Sept. 2003.
- [11] D. Pompili, T. Melodia, Three-dimensional routing in underwater acoustic sensor networks, in: Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks (WASUN'05), Montreal, Calif, USA, pp. 214-221, Oct. 2005.
- [12] R. A. Albukhary, F. Bouabdallah, Time-variant balanced routing strategy for underwater wireless sensor networks, Wireless Networks, 2019, Vol 25, pp 3481-3495.
- [13] H. Yu, N. Yao, J. Liu, An adaptive routing protocol in underwater sparse acoustic sensor networks, Ad Hoc Networks, 2014.
- [14] D. M. Ibrahim et al., Enhancing the Vector-Based Forwarding Routing Protocol for

- Conference on Multimedia Information Networking and Security, 2010.
- [40] B. Wei, Y. Luo, Z. Jin, J. Wei, Y. Su, ES-VBF: An Energy Saving Routing Protocol, International Conference on Information Technology and Software Engineering, Lecture Notes in Electrical Engineering, 2013.
- [41] P. Hemavathy, Indumathi, Deep learning-based hybrid dynamic biased track (DL-HDBT) routing for under water acoustic sensor networks, Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, No. 6, pp 134-142, 2020.
- [25] W. Ping et al., A reliable and efficient routing protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks, IEEE, pp. 185 – 190, 2013.
- [26] Y. Chen et al., Mobicast Routing Protocol for Underwater Sensor Networks, IEEE Sensors Journal, pp. 737 – 749, 2013.
- [27] R. Rahman, C. Benson, M. Frater, Routing protocols for underwater ad hoc networks, IEEE, 2012.
- [28] R. Coutinho, L. Vieira, A. Loureiro, DCR: Depth-Controlled Routing protocol for underwater sensor networks, IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), pp. 453 – 458, 2013.
- [29] L. Emokpae, M. Younis, Signal reflection-enabled geographical routing for underwater sensor networks, IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 147 – 151, 2012.
- [30] E. Sozer, M. Stojanovic, and J. Proakis, Underwater acoustic networks, IEEE J. Oceanic Eng., vol. 25, no. 1, pp. 72-83, 2000.
- [31] L. Uichin, et al., Pressure routing for underwater sensor networks. In: Proceedings of the IEEE, INFOCOM, 2010.
- [32] M. R. Khosravi, H. Rostami, R. Salari, A Solution for Scalable Routing in Depth Divisions-Based DUSNs via Adding a Scalable Parameter to Control Depth Clusters: Creating an Energy Efficient and Low Delay NI-Independent Communication Protocol, Journal of Computer and Communications, vol. 4, no. 7, pp 55-61, 2016.
- [33] P. Esfandiari, Improving VBF protocol by using a nature-inspired algorithm in underwater sensor networks (UWSNs), M.Sc. Thesis, Shiraz University, 2011.
- [34] A. S. Tanenbaum, COMPUTER NETWORKS, 5th ed., Prentice Hall, 2011.
- [35] T. Ali, L. T. Jung, I. Faye, Diagonal and Vertical Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Network, International Conference on Innovation, Management and Technology Research (ICIMTR'13), Malaysia, pp. 372-379, 2013.
- [36] H. Karl, A. Willig, Protocols and architectures for wireless sensor networks, 1st edition, John Wiley & Sons, 2005.
- [37] G. Han et al., Routing Protocols in Underwater Acoustic Sensor Networks: A Quantitative Comparison, International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015.
- [38] A. Wahid and D. Kim, An Energy Efficient Localization-Free Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Networks, International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012.
- [39] C. Su, X. Liu, F. Shang, Vector-based low-delay forwarding protocol for underwater wireless sensor networks, International